**УДК 628****Л.А. Назаренко.**, докт.техн.наук,**В.М. Поліщук** канд.техн.наук,**Л.Г. Баландаєва***Харківська національна академія
міського господарства***СПЕКТРОРАДІОМЕТРИЧНІ МЕТОДИ****1. Спектрорадіометрична версія фотометричних величин, визначення і одиниці.**

Радіометрія є наука і техніка вимірювання енергії електромагнітного випромінювання. Кажучи простіше, вона відноситься до вимірювань оптичного випромінювання. В той же час коли радіометрія включає вимірювання повної енергії, випромінюваної джерелом по всьому спектру (1нм-1000мкм), то спектрорадіометрія має відношення до спектрального аспекту випромінюючого джерела, фотометрія концентрується тільки на частині оптичного спектру, до якого чутливе людське око (380-780нм). Визначаючи більш точно, фотометрія відноситься до вимірювань енергії випромінювання в «видимій» області спектра, яку відчуває стандартний фотометричний спостерігач. Не строго кажучи за стандартний фотометричний спостерігач можна вважати «усереднену» людину.

Ряд радіометричних, спектрорадіометричних і фотометричних величин використовуються для опису випромінюючих джерел. Хоча в минулому була невідповідність відносно цих визначень, в наш час вони найбільш загально використовувані.

1.1. Радіометричні величини.

Радіометричні величини, які проводяться нижче, є найбільш часто використовуваними в оптичному випромінюванні.

Енергія випромінювання (radiant energy) є повна енергія, випромінювана джерелом (в Дж).

Густина енергії випромінювання (radiant energy density) є енергія випромінювання на одиницю об'єму (Дж·м⁻³).

Потужність випромінювання або потік (radiant power or flux) є енергія випромінювання за одиницю часу (Дж·сек.⁻¹)

Енергетична світимість (radiant emittance) є повний потік випромінювання джерела поділений на площу поверхні цього джерела (вт·м⁻²).

Опроміненість (irradiance) є повний потік випромінювання, який падає на елемент поверхні, поділений на площу поверхні даного елемента (вт·м⁻²).

Сила випромінювання (radiant intensity) є повний потік випромінювання, який розповсюджується від джерела випромінювання, в одиничному тілесному куті в заданому напрямку (вт ср⁻¹).

Енергетична яскравість (radiance) є сила випромінювання джерела, поділена на площу джерела (в вт ср⁻¹ м⁻²), рис.1 показує геометрію визначення енергетичної яскравості.

За одиницю тілесного кута – стерadian (ср) прийнято центральний тілесний кут, який вирізає частину сфери, площа якого дорівнює квадрату її радіусу.

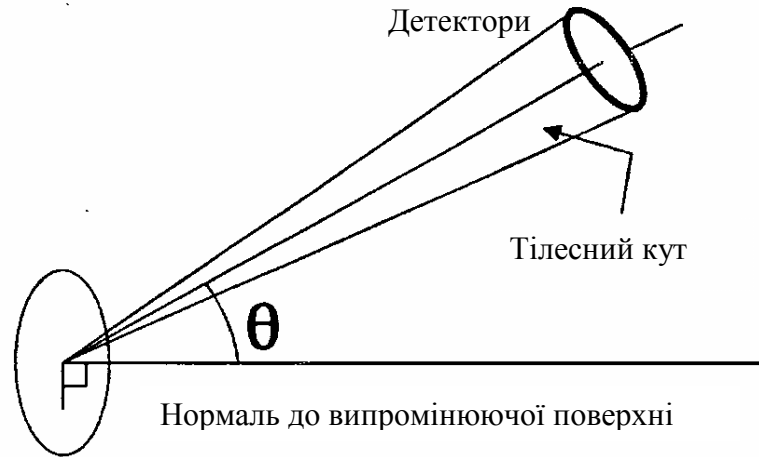


Рис.1. Геометрія для визначення енергетичної яскравості

Випромінювальна здатність (emissivity) є відношення густини потоку випромінюваного джерелом, до цієї ж величини, випромінюваній «чорним тілом» при тій же самій температурі.

Чисто фізичні величини, для яких енергія випромінювання оцінюється в енергетичних величинах, визначається в табл. 1.

Таблиця 1. Фундаментальні величини

Величина	Позначення	Визначаюче рівняння	Одиниці
Енергія випромінювання	Q, Q_e		Дж (джоуль)
Густина енергії випромінювання	W, W_e	dQ/dv	Дж м ⁻³
Потужність випромінювання або потік	Φ, Φ_e	$d\Phi/dt$	Дж с ⁻¹ або Вт(ватт)
Енергетична світімість	M, M_e	$d\Phi/dA_{\text{джерела}}$	Вт м ⁻²
Опроміненість	E, E_e	$d\Phi/dA_{\text{поверхні}}$	Вт м ⁻²
Сила випромінювання	I, I_e	$d\Phi/d\Omega$	Вт ср ⁻¹
Енергетична яскравість	L, L_e	$d^2\Phi/d\Omega(dA\cos\theta)$ $dI/dA\cos\theta$	Вт м ⁻² ср ⁻¹
Випромінювальна здатність	ϵ	$M/M_{\text{чорне тіло}}$	

1.2. Фотометричні величини.

Коли радіометричні величини, представлені в табл.1, оцінюються за допомогою стандартного фотометричного спостерігача, вони відповідають аналогічній фотометричній величині (див. табл.2). Кожна пара величин (радіометрична та фотометрична), представлені тим же самим принциповим позначенням (виключаючи поглинальну здатність і світову ефективність) і відрізняються лише індексом.

Індекс e (energy) (або коли немає індексу) використовується у випадку енергетичних (радіометричних) величин і індекс v (visual) використовується для фотометричних величин.

Таблиця 2.

Величина	Позначення	Визначальне рівняння	Одиниці
Світлова енергія	Q_v	$K_m \int V(\lambda) Q(\lambda) d\lambda$	лм·с
Густина світлової енергії	W_v	dQ_v/dV	лм·с·м ⁻³
Світловий потік	Φ_v	dQ_v/dt	лм (люмен)
Світимість	M_v	$d\Phi_v/dA_{\text{джерела}}$	лм·м ⁻²
Освітленість	E_v	$d\Phi_v/dA_{\text{поверхні}}$	лм·м ⁻²
Сила світла	I_v	$d\Phi_v/d\Omega$	лм·с ⁻¹ або (кандела)
Яскравість	L_v	$D^2 \Phi_v / d\Omega (dA \cos \Theta)$ $dI_v / dA \cos \Theta$	кд·м ⁻²
Світлова ефективність	K	Φ_p / Φ	лм·вт ⁻¹

Базовою одиницею вимірювання світла є люмен. Всі інші фотометричні величини включають люмен.

Світлова енергія (luminous energy) є повна енергія, яка відчувається стандартним спостерігачем для поля зору рівного 2° (в лм·с).

Густина світлової енергії (luminous energy density) є світлова енергія на одиницю об'єму (в лм·с·м⁻³).

Світловий потік є світлова енергія за одиницю часу (в лм).

Світлова світимість (luminous emittance) є відношення світлового потоку випромінюваного його джерелом, до площі поверхні цього джерела (в лм·м⁻²).

Опроміненість (illuminance) є світловий потік, що падає на поверхню, на одиницю цієї поверхні (в лм·м⁻²).

Сила світла (luminous intensity) є світловий потік в одиничному тілесному куті в заданому напрямку (в лм·ср⁻¹ або кандела).

Яскравість (luminance) є відношення сили світла до площі джерела (в кд·м⁻²).

Світлова ефективність є (luminous efficacy) є відношення повного світлового потоку до повного потоку випромінювання (в лм·вт⁻¹).

1.3. Спектрорадіометричні величини.

Коли енергія випромінювання або будь яка інша споріднена величина, вимірюється в термінах монохроматичних компонент, вона стає функцією довжини хвилі.

Таким чином позначення цих величин повинно супроводжуватися прикметником, спектральний, наприклад спектральна освітленість. Символ для кожної величини супроводжується символом для довжини хвилі (λ). Наприклад, спектральна освітленість має символ $E(\lambda)$ або $E_e(\lambda)$.

Якщо спектральний розподіл джерела відомий, наступне співвідношення між люменом і ваттом може бути використано для перетворення одного в друге:

$$\Phi_v = 683 \int_{\lambda} \Phi(\lambda) V(\lambda) d(\lambda) \text{ (лм)},$$

де $\Phi(\lambda)$ - спектрорадіометричний розподіл потужності світлового джерела (вираженого в «ватт на одиничний інтервал довжини хвилі»);
 $V(\lambda)$ - відносна функція світлової ефективності (нормованої при 555нм);
 λ - довжина хвилі (звичайно виражена в нанометрах). Значення 683 лм/ватт є абсолютно світлова ефективність при 555нм.

Якщо виконане фотометричне або радіометричне вимірювання джерела світла неможливо перетворити фотометричні в радіометричні величини або навпаки, якщо спектральний розподіл джерела точно невідомий. У спеціальному випадку монохроматичного джерела світла, такого як лазер, рівняння спрощується, як показано нижче.

Для прикладу, у випадку 1 мілліватного He-Ne лазера світловий потік на довжині хвилі $\lambda=633\text{нм}$ дорівнює

$$\Phi_v = (683\text{лм}) \Phi(633\text{нм}) V(633\text{нм}) = 683 \times 10^{-3} \times 0,2353344 = 0,11607\text{лм}$$

Взагалі вимірювання спектрального сигналу світлового джерела будуть забезпечувати більш точні фотометричні дані.

1.4. Коефіцієнт пропускання.

Коефіцієнт пропускання (transmittance) – величина, яка визначається відношенням пройденого потоку випромінювання до падаючого потоку випромінювання.

Світловий коефіцієнт пропускання

$$\tau_v = \Phi_v^t / \Phi_v^i ;$$

Спектральний коефіцієнт пропускання

$$\tau(\lambda) = \Phi^t(\lambda) / \Phi^i(\lambda).$$

Індекс t відноситься до пройденого потоку, а i – до падаючого потоку.

Загальний коефіцієнт пропускання середовища (або об'єкта) складається із двох частин, коефіцієнта направленного пропускання (τ_r) і дифузного коефіцієнта пропускання (τ_d):

$$\tau = \tau_r + \tau_d.$$

Якщо радіаційний або світловий потік проходить через зразок таким чином, що кут переломлення може бути передбачений через кут падіння відповідно закону Снелля, то коефіцієнт пропускання відноситься до направлених. Коли потік розсіюється при переході через зразок, або в макроскопічному масштабі закон Снелля не виконується із-за жорсткості поверхні, коефіцієнт пропускання відноситься до дифузних.

Світловий (або фотометричний) коефіцієнт пропускання середовища є залежним від спектрального складу джерела випромінювання. Відповідно, природа випромінювання джерела повинна бути встановлена, коли визначається фотометричний коефіцієнт пропускання середовища. Наприклад фотометричний коефіцієнт пропускання блакитного фільтру буде суттєво вище, коли джерелом випромінювання є ксенонова дугова лампа, ніж коли джерелом буде вольфрамова лампа розжарювання при кольоровій температурі 2856 К.

Фотометричний коефіцієнт пропускання для середовища з визначеним джерелом випромінювання може бути визначений фотометрично або спектрорадіометрично. Проте визначене джерело випромінювання (або джерело з тим же самим спектральним розподілом) повинно використовуватись коли застосовується фотометричний спосіб. Користувачі часто не в змозі обчислити спектральний розподіл випромінювання джерела коли проводять спектрорадіометричні обчислювання. У той же час це є важливо – фотометричний коефіцієнт пропускання середовища є еквівалентним визначенню «джерела рівної енергії», тобто джерела яке має рівну енергію на всіх довжинах хвиль у видимому спектрі – необхідно при цьому взяти до уваги, що це не є практичним джерелом для порівняльних фотометричних вимірювань.

Фотометричний коефіцієнт пропускання (τ_v) може бути обчислений через спектральний коефіцієнт пропускання [$\tau(\lambda)$] і відносний спектральний розподіл визначеного джерела [$\Phi(\lambda)$] наступним чином

$$\tau_v = \int \tau(\lambda) \Phi(\lambda) V(\lambda) d\lambda,$$

де $V(\lambda)$ - відносна світлова ефективність.

1.5. Коефіцієнт відбиття.

Коефіцієнт відбиття (reflectance) – величина, яка визначається відношенням відбитого потоку випромінювання до падаючого потоку випромінювання.

Світловий коефіцієнт відбиття

$$\rho_v = \frac{\Phi_v^r}{\Phi_v^i};$$

Спектральний коефіцієнт відбиття

$$\rho(\lambda) = \frac{\Phi^r(\lambda)}{\Phi^i(\lambda)}.$$

Індекс «r» відноситься до відбитого потоку і індекс «i» до падаючого потоку. Повний коефіцієнт відбиття об'єкту (ρ) ділиться на дві частини коефіцієнт дзеркального відбиття (ρ_s) і коефіцієнт дифузного відбиття (ρ_d), де $\rho = \rho_s + \rho_d$.

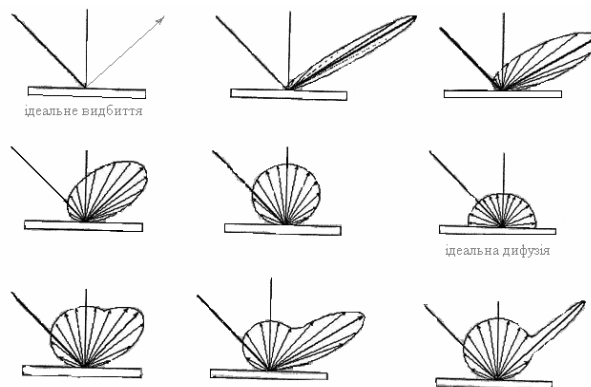


Рис. 2. Типи відбивань: дзеркальне, напівдзеркальне і дифузне відбиття.

Коефіцієнт дзеркального відбиття складається із відбиття радіаційного або світлового потоку без розсіювання або дифузності у відповідності із законами оптичного відбиття як від дзеркала.

Коефіцієнт дифузного відбиття складається із розсіяного відбитого потоку у всіх напрямках.

Як із фотометричним коефіцієнтом пропускання, фотометричний коефіцієнт відбиття об'єкта є залежним від спектрального складу джерела випромінювання і спектральний склад цього джерела повинен бути відомим або визначеним, коли визначають фотометричний коефіцієнт відбиття.

Також як і випадку з фотометричним коефіцієнтом пропускання, фотометричний коефіцієнт відбиття може бути визначеним фотометрично або спектрорадіометрично.

1.6. Спектральна чутливість.

Спектральна чутливість (spectral responsivity) $R(\lambda)$ взагалі відноситься до електричних сигналів, генеруємих фотоприймачами $[s(\lambda)]$ коли опромінюються відомим потоком на певній довжині хвилі $[\Phi(\lambda)]$ і визначається за допомогою співвідношення.

$$R(\lambda) = s(\lambda) / \Phi(\lambda).$$

Вихідний сигнал приймача може бути в амперах, ваттах тощо.

Спектральна чутливість фотоприймача може бути або у вхідному сигналі за потужністю або у вихідному сигналі за освітленістю. Якщо відклик за потужністю взагалі включає заповнення приймача монохроматичним потоком, у той час як для відгуку за освітленістю необхідне однорідне заповнення приймача монохроматичним потоком. Можливо перетворити один тип відгуку на інший коли площа приймальної поверхні (чутлива частина фотоприймача) відома і якщо ця площа однорідна за чутливістю.

2. Спектрорадіометричні еталони.

Точні вимірювання оптичного випромінювання включають не тільки використання стабільних добре досліджених фотометрів, радіометрів або спектрорадіометрів, але також і еталонів. Цей еталон може бути у вигляді випромінюючого джерела, вихідний потік енергії якого і геометричні властивості точно відомі, або приймача, чий вихідний сигнал також точно відомий. Для більшості спектрорадіометричних застосувань, еталонне джерело може бути використано для калібрування вимірювальних систем, якщо система повинна використовуватись для вимірювання спектральних вихідних сигналів джерел.

Еталонний приймач може використатись для калібрування вимірювальних систем, якщо система буде використовуватись для вимірювання спектрального відгуку приймачів. Ми розглянемо «базові» спектрорадіометричні еталони, які введені в Національному Інституті еталонів і технологій (National Institute of Standards and Technology (NIST), США) і які є в комерційних калібрувальних лабораторіях.

2.1. Еталони «абсолютне чорне тіло».

Більшість спектрорадіометричних еталонів засновано на спектральній яскравості «абсолютно чорного тіла» (АЧТ), яка визначається відповідно закону випромінювання Планка. «Абсолютне чорне тіло» є теоретичним джерелом, чия внутрішня поверхня поглинає весь падаючий потік енергії незалежно від довжини хвилі і кута падіння.

Закон Планка визначає спектральну яскравість L_λ АЧТ таким чином

$$L_\lambda = \frac{c_1}{n^2 \lambda^2 (e^{c_2/n\lambda T} - 1)} \quad (\text{Вт см}^2 \text{ср})$$

де c_1 - перша стала випромінювання ($3,7418 \cdot 10^{-12}$ Вт см²);

c_2 – друга стала випромінювання (1,4388 см К);

n – коефіцієнт заломлення повітря;

T - термодинамічна температура, К.

Коли потік випромінювання падає на об'єкт, він або відбивається (ρ), проходить (τ), або поглинається (α).

Таким чином $\rho + \tau + \alpha = 1$.

Якщо вся енергія, що падає на об'єкт, поглинається, коефіцієнт поглинання дорівнює одиниці і, відповідно до закону Кірхгофа, випромінювальна здатність об'єкта також дорівнює одиниці. В дійсності, абсолютного поглинач для всіх довжин хвиль і у всьому діапазоні температур не існує. Є ряд чорних фарб, окисдованих металів і чорнінь, які мають коефіцієнти поглинання 0,9 або краще, проте ніколи не досягають одиниці. Проте, напівдосконалий поглинач або випромінювач може бути зформований поміщенням малого отвору в стінці ізотермічної порожнини, в якій внутрішня поверхня має високий коефіцієнт поглинання ($\geq 0,9$).

При цьому маємо таке:

- 1) приблизно 90% потоку енергії, який падає на поверхню поглинається;
- 2) залишково 10% дифузно відбивається (забезпечена тим, що внутрішня поверхня сфери має дифузні коефіцієнти відбиття;
- 3) нехтуюча частина потоку випромінювання буде виходити через малий отвір при першому відбитті;
- 4) суттєво менші частини падаючого потоку випромінювання будуть виходити через отвір при відбиттях вищого порядку.

Якщо ретельно вибрана форма порожнини, її матеріал, спосіб нагріву, пристрій може бути сконструйовано таким чином, що коефіцієнт поглинання або випромінювальна здатність дуже близька до одиниці. Існує багато методів для обчислювання ефективної випромінювальної здатності різних випромінюючих порожнин.

Є багато АЧТ які мають різні геометричні форми сконструйовані із різних матеріалів і використовуються у різних температурних діапазонах. Деякі із цих АЧТ портативні, деякі виключно лабораторні інфрачервоні еталони, які працюють при температурах твердіння різних металів. Більшість з цих АЧТ використовуються як первинні еталони для інфрачервоного спектру вище 1000нм. АЧТ, придатні для використання в видимому діапазоні спектра повинні працювати при температурі 2500K і вище. Вони є надзвичайно дорогими пристроями і не використовуються в практиці лабораторних калібрувань.

2.2. Еталони спектральної яскравості NIST.

За виключенням випромінювачів типу «абсолютне чорне тіло», не було зручних спектрорадіометричних еталонів приблизно до 1960 року. Хоча «чорне тіло» було і все ще залишається первинним еталоном, який використовується для більшості інфрачервоних калібрувань, його використання в ультрафіолетовій, видимій, ближній інфрачервоній області спектра є дуже обмеженим. Шкала спектральної яскравості NIST складається із ламп з вольфрамовою стрічкою, чие калібрування засноване на радіаційному потоці, що випромінює «абсолютне чорне тіло» з відомою температурою, як визначено формулою Планка.

Спочатку NISTом була вибрана лампа типу GE 30A/T24/3. Вона має біпост цоколь і номінальні значення живлення 30A при 6В. Радіаційна енергія випромінюється від плоскої смуги нитки розжарення через вікно розміром 1,25 дюйма зварене із кремнію і розташоване на оболонці лампи. Вікно паралельне і на відстані біля 3-4 дюймів від площини нитки розжарювання. Спектральна яскравість визначена в діапазоні хвиль 225-2400нм.

Встановлена невизначеність змінюється з довжиною хвилі від 1,0% при 225нм до 0,3% при 2400 нм і становить біля 0,6% в видимому спектрі. Типові значення спектральної яскравості показані в таблиці 2.1.

Лампи з вольфрамовими стрічками розжарювання знайшли широке використання в спектрорадіометричних калібрувальних і інших вимірювальних системах, які широко використовуються для вимірювання спектральної яскравості малих об'єктів. Про-

те використання цих еталонів яскравості обмежується малими калібрувальними поверхнями, які можуть калібруватися і низькою яскравістю, які еталони забезпечують при менших довжинах хвиль. Ці еталони є зручними коли вимірюють спектральну яскравість плазми, пристосувань або інших випромінюючих джерел з малими поверхнями. Еталони яскравості можуть також використовуватися як еталони освітленості, при цьому нитка розжарювання ретельно переноситься зображенням у невелику прецизійну щілину, з точно вимірним розміром отвору. Освітленість на відстані від отвору може тоді бути обчислена. Проте існує ряд труднощів: поверхня джерела яка обмежує границі рівня освітленості зовсім мала; ефективні коефіцієнт відбиття і проходження зображуючої оптики повинні вимірюватися; і кутове поле обмежене.

Таблиця 2.1. Виміряні значення спектральної яскравості і температура лампи.

λ (нм)	L_λ , Вт см ⁻³ ср ⁻¹	T_{bb} (K)	λ (нм)	L_λ , Вт см ⁻³ ср ⁻¹	T_{bb} (K)
225	8,805	2677,3	575	97830	2534,3
230	13,23	2677,1	600	113700	2521,5
240	28,11	2676,3	654,6	147300	2493,2
250	55,41	2674,7	675	158600	2481,9
260	102,7	2672,9	700	171800	2468,4
270	180,5	2671,0	750	194000	2440,6
280	302,8	2669,1	800	211800	2414,1
290	480,7	2665,4	900	229000	2356,7
300	738,4	2662,2	1050	223400	2269,4
325	1867	2653,0	1200	198100	2183,0
350	4003	2643,0	1300	177000	2125,9
375	7540	2632,4	1550	127300	1991,8
400	12770	2620,8	1700	102600	1916,3
450	29100	2596,9	2000	66390	1778,6
475	40160	2584,6	2100	57480	1736,0
500	52880	2572,0	2300	42780	1650,3
550	82060	2546,8	2400	37740	1618,1

2.3. Еталони спектральної освітленості NIST.

NIST ввів кварцові галогенні лампи як еталони спектральної освітленості у 1963р. Для того щоб виключити проблеми, пов'язані з використанням вольфрамових ламп розжарювання – еталонів спектральної яскравості GE 200-W була випробувана кварцова йодна лампа і було показано, що вона має прийнятні характеристики для використання в якості еталона освітленості. Це лампа з малою кварцовою оболонкою відносно гарної оптичної якості. Невеликий розмір оболонки лампи разом з малою поверхнею нитки розжарювання в результаті приводить до приблизно точкового джерела для поля освітленості при достатньо близьких відстанях, таким чином це дозволяє поміщувати лампу в межах 0,5м від спектрорадіометра. Вольфрамово-галогенний цикл дозволяє деяким лампам діяти при кольорових температурах таких як 3100K, таким чином досягається суттєво вищі рівні освітленості в ультрофіолетовому діапазоні. Ці нові еталони були прокалібровані в діапазоні хвиль 250-2500нм. Подібна 1000 ваттна лампа була введена NIST у 1965 році калібруванням відносно 200 ваттних еталонів.

Цей еталон має рівень освітленості приблизно в 5 разів вище, ніж початковий 200-ваттний еталон. В 1975 році NIST переключився від 1000 ватної DXW лампи до 1000 ваттної FEL типу ламп. Ці FEL лампи були перетворені до цоколя, який дозволяє

більш зручне використання з кінематичним тримачем лампи, переміщувати й поміщувати в ту же саму позицію (рис. 2.1).

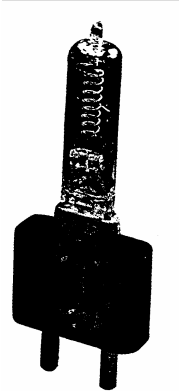


Рис. 2.1. Еталонна лампа FEL спектральної опроміненості.

Калібрування FEL еталонів спектральної освітленості заснована на еталонах NIST спектральної яскравості і калібрується в діапазоні 250-2400нм. Типові значення спектральної освітленості дається в таблиці 2.2.

Встановлена невизначеність змінюється з довжиною хвилі від 2,23% при 250 нм до 6,51% при 2400нм і має середню невизначеність біля 1% у видимому діапазоні.

2.4. Еталонний приймач NIST.

NIST встановлює шкалу абсолютної спектральної чутливості за допомогою високоточного кріогенного радіометра. Таблиця 2.3. дає встановлені невизначеності вимірюні кремнієвим фотодіодом, прокаліброваним відносно шкали NIST.

2.5. Спектрорадіометричні еталони спеціального призначення.

2.5.1. Еталони спектральної яскравості з сапфіровими вікнами.

Цей еталон складається із спеціально модифікованої лампи з вольфрамовою стрічкою розжарювання (GE 18A/T10/2P) і, сапфіровим вікном. Ці еталони були створені для забезпечення єдиного еталона яскравості, який міг би використовуватися у всьому діапазоні 250-6000нм довжин хвиль і також забезпечення альтернативи більш дорогим і більш складним у виробництві GE 30A/T24 лампам.

Спектральна яскравість цих еталонних ламп з сапфіровим вікном переноситься до еталона NIST спектральної яскравості у діапазоні 250-2400 нм і за калібровкою по АЧТ у діапазоні 2400-6000нм. Встановлена невизначеність цих еталонних засобів спеціального призначення відносно шкали NIST у видимому спектрі дорівнює 2%.

Еталони спектральної освітленості, які мають потужність 1000, 200 і 45 ватт, становить набір еталонів спектральної освітленості спеціального призначення.

Таблиця 2.2. Спектральна опроміненість 1000 вт лампи на 50 см.

$\lambda(\text{нм})$	E_λ (вт·см ⁻³)	$\lambda(\text{нм})$	E_λ (вт·см ⁻³)	$\lambda(\text{нм})$	E_λ (вт·см ⁻³)	$\lambda(\text{нм})$	E_λ (вт·см ⁻³)	$\lambda(\text{нм})$	E_λ (вт·см ⁻³)
250	0,182	320	3,549	390	18,31	700	190,3	1540	126,0
260	0,320	330	4,752	400	21,77	800	221,9	1600	166,9
270	0,531	340	6,223	450	44,06	900	231,6	1700	101,6
280	0,833	350	7,998	500	73,12	1050	220,7	2000	67,1
290	1,258	360	10,05	555	108,7	1150	203,0	2100	59,7
300	1,830	370	12,46	600	137,5	1200	193,1	2300	46,0
310	2,592	380	15,22	654,6	168,6	1300	173,3	2400	40,0

Таблиця 2.3. Невизначеність вимірювань абсолютної чутливості*

Діапазон довжин хвиль	Невизначеність
$400\text{нм} \leq \lambda \leq 440\text{нм}$	± 0.7
$440\text{нм} \leq \lambda \leq 900\text{нм}$	± 0.22
$900\text{нм} \leq \lambda \leq 1000\text{нм}$	± 0.3
$1000 \leq \lambda \leq 1100\text{нм}$	± 0.7

* Це відносно розширена невизначеність ($k=2$).

Ці еталони прямо переносять одиниці від NIST FEL еталона спектральної освітленості в діапазоні 250-2400нм і за калібровками АЧТ для довжини хвиль вище 2400нм. В той час спектральна освітленість 1000 ваттної DXW лампи еталона подібно їй, як в еталоні FEL 1000 ватт; 200 ваттна і 45 ваттні еталони мають рівень освітленостей в 5 раз і 20 раз менший, ніж 1000 ваттний FEL еталон, відповідно. Проте всі ці еталони калібруються, коли працюють при кольоровій температурі біля 3000К, таким чином відносний спектральний розподіл приблизно той же самий у всіх цих ламп. Встановлена невизначеність відносно шкали NIST порядку 1% в видимому спектрі.

2.5.2. Штир'ова вольфрамова лампа, як еталон спектральної освітленості.

Штир'ові еталони освітленості призначені для точного калібрування різноманітних спектрорадіометрів по сигналу (відклику) спектральної освітленості. Ці еталони складаються із компактної 200-ваттної вольфрамової галогенної лампи, яка діє при температурі біля 3000К. Мала робоча відстань порядку 13 см забезпечує рівні освітленості суттєво вищі, ніж звичайно одержуємо з еталонами вищої потужності. Комбінація більшої точності в оптичному юстуванні і вищі рівні освітленості забезпечують більш точне калібрування спектрорадіометра.

Концепція «модульності» і попереднього юстування також виключає складне і довгочасне регулювання установки, що звичайно пов'язано з спектрорадіометричними еталонами, так як в нашому випадку вони просто прикріплюються до інтегруючої сфери вхідною оптикою частини спектрорадіометра. Ці еталони складають 1% невизначеності відносно шкали NIST у видимому діапазоні.

2.5.3. Інтегруюча сфера як калібрувальний еталон.

Всі спектрорадіометричні еталони описані тут, калібруються або за спектральною яскравістю або за спектральною освітленістю, вони калібруються тільки за певних умов, тобто за одному визначеному струмі лампи, одній відстані і т. ін. На додаток, всі ці еталони, за виключенням «модульних і попередньо тестованих» еталонів, працюють на відкритому повітрі і не можуть точно бути ослаблені. Для багатьох застосувань, необхідно для великих поверхонь однорідно випромінююче джерело, яке точно калібрується за спектральною яскравістю, і в деяких випадках, калібрується за спектральною освітленістю. На додаток може бути необхідне точне послаблення яскравості або освітленості джерела. Ретельно сконструйований комплект інтегруюча сфера – вольфрамова лампа відповідають вищевказаному критерію.

Калібрувальний еталон – інтегруюча сфера звичайно складається із двох частин: модуль джерела з оптичною голівкою і окремий електронний контроллер. Типове сферичне джерело показано на рис. 2.2.

Він включає 150 ваттну вольфрамову галогенну рефлекторну лампу з мікрометром – контролюємою змінною апертурою між лампою і інтегруючою сферою для зміни вхідного потоку до сфери. Інтегруюча сфера покрита високо відбиваючим матеріалом, таким як політетрафторетілен (PTFE) або BaSO₄. Ці матеріали мають коефіцієнт відбиття понад 39% у всьому видимому діапазоні. Змінна апертура на вхідному порті сфери забезпечує для неперервної регулювання яскравості сфери в діапазоні більш ніж 10⁶. Прецизійний кремнієвий приймач в комбінації з фільтром видимості монтується на стін-

ці сфери і вимірює освітленість сфери. Електронний контроллер містить потужну лампу живлення і фотометричний підсилювач. Джерельний модуль з оптичною голівкою сконструйований так, може бути конфігурований з різними розмірами інтегруючих сфер, таким чином діаметри вихідного порту (випромінюючого) може бути зробленим більшим, якщо діаметр сфери збільшується.

Відношення 4:1 діаметра сфери до діаметра вихідного порту взагалі забезпечує однорідність яскравості на вихідному порті $\pm 0,5\%$.

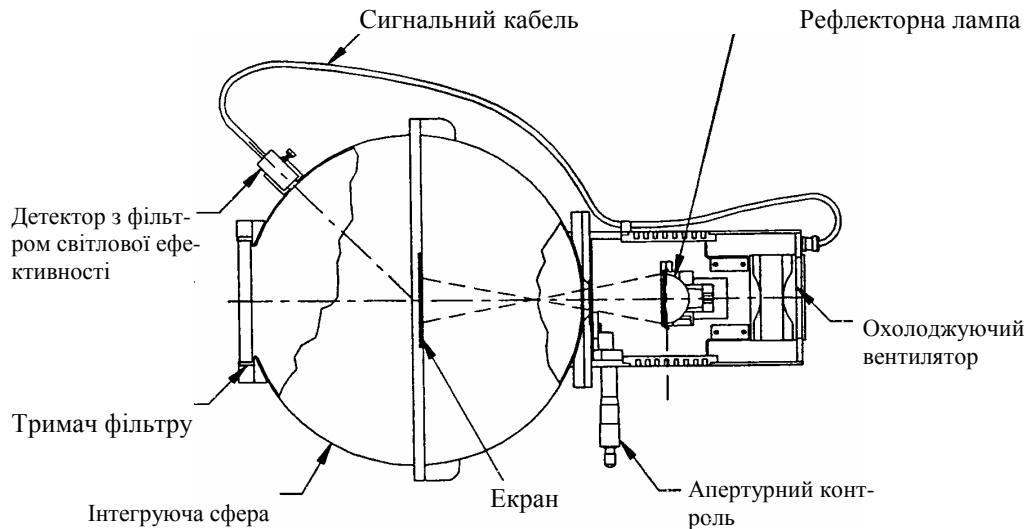


Рис. 2.2. Розріз калібрувального еталона-інтегруючої сфери.

Оскільки джерела на базі інтегруючої сфери мають цілком однорідну яскравість і мають добре визначену випромінюючі поверхні, спектральна освітленість може бути обчислена один раз, коли джерело калібрується за спектральною яскравістю. Необхідно відмітити, що ці джерела на базі інтегруючої сфери також використовується широко як фотометричні еталони. Взагалі, приймач або фільтр видимості, які служать для моніторингу в стінці сфери, калібруються так, що яскравість сфери показується на електронному контроллері.

Сферичне джерело конструкцією з 4 дюймовим діаметром інтегруючої сфери буде мати вихідний порт діаметром в 1 дюйм з регульованою яскравістю від 100000 до 0,001 кд/м². 12 дюймова версія буде мати тридюймовий випромінюючий порт з регульованою яскравістю від 12000 до 0,001 кд/м². Типова встановлена невизначеність дорівнює 2% відносно шкали NIST.

Для вимірювальних застосувань потребуються навіть нижчі вихідні рівні ніж, ті, які одержується від сферичних джерел, описаних вище. Для надзвичайно низьких світлових рівней можливе джерело на базі інтегруючої сфери, так як показано на рис.2.3.

Це джерело подібно до того, що описано вище, проте два методи використовуються для ослаблення сферичної яскравості без зміни спектрального розподілу джерела. Низьковаттна вольфрамова галогенна лампа монтується на пересувному траку таким чином, що відстань від лампи до вхідного порту сфери може бути варійована від 5 до 30 см. Безпосередньо перед вхідним портом сфери знаходиться шестипозиційне апертурне колесо, які містить прецизійні апертури, що мають діаметри від 28 до 0,15мм. Таким чином, комбінація змінювання лампи – відстань сфери і виставлення різних розміром апертур перед вхідним портом, дає можливість встановлювати точне значення яскравості або освітленості випромінюючого порту. Це джерело на базі інтегруючої

сфери також конструюється таким чином, що оптична голівка може бути з різними розмірами сфери.

Рівні яскравості такі низькі, як від 10^{-5} кд/м² можуть бути одержані в цій конструкції.

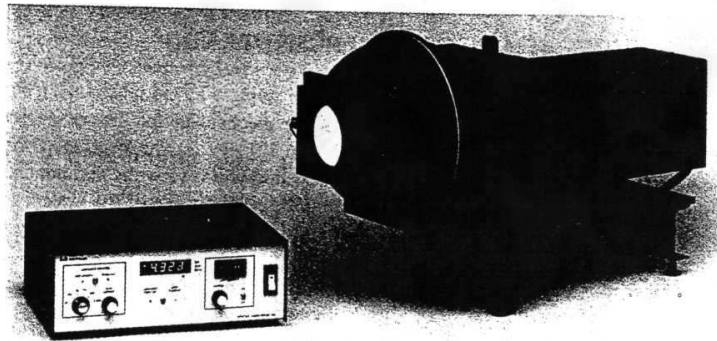


Рис. 2.3. Калібрувальний еталон на базі інтегруючої сфери для низьких світлових рівней.

В деяких випадках бажано мати навіть більші випромінюючі поверхні, ніж це можливо від джерел на базі інтегруючої сфери, описаних вище. Ці сферичні джерела взагалі мають одну або більш ламп, вмонтованих в середині сфери. Ослаблення пов'язані з виключенням однією або більше ламп.

Взагалі, значення спектральної яскравості для калібрувальних еталонів на базі інтегруючої сфери відповідають визначеним значенням струму ламп. Варіюючи діючий струм не тільки змінюють величину спектральної яскравості але і спектральний розподіл. Таким чином, це обов'язкова вимога того, що лампи мають діяти за визначеним струмом, коли використовується як спектрорадіометричний еталон. Проте це не в тому випадку, коли ці джерела на базі інтегруючої сфери використовуються як фотометричні стандарти. Кремнієвий детектор – фільтр видимості буде вимірювати яскравість і точність показу яскравості, не залежить від струму забезпечується тим, що детектор – фільтр точно підібраний до функції світлової ефективності відповідно до Міжнародної комісії по освітленості (CIE).

СПЕКТРОРАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Л.А. Назаренко, В.Н. Полищук, Л.Г. Баландаева

В данной статье были рассмотрены методы и способы измерения эталонных радиометрических, фотометрических и спектрорадиометрических величин.

SPECTRORADIOMETRIC METHODS

L.A. Nazarenko, V.N. Polischuk, L.G. Balandaeva

In this review is considered methods of etalon measurements radiometric, photometric and spectroradiometric values.